

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Měřicí jednotka s tenzometrem pro internet věcí
Measurement Unit with Strain Gauge Sensor
for the Internet of Things

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Čepelák**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612R041 Řídicí a informační systémy
Téma: **Měřicí jednotka s tenzometrem pro internet věcí**
Measurement Unit with Strain Gauge Sensor for the Internet of Things
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je konstrukce, návrh a implementace smart zařízení pro měření zatížení střech a systému včasného varování, respektive aplikace tenzometru pro tento druh měření.

V souhrnu je práce charakterizována těmito body:

1. Rešerše využití tenzometrů pro predikci havarijních stavů střech.
2. Návrh a realizace jednotky pro tenzometr.
3. Návrh a implementace software pro ověření funkčnosti jednotky.
4. Test modelu s výstupem do databáze pro pozdější zpracování dat.
5. Zhodnocení práce a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] MOLLOY, Derrek. *Exploring Raspberry Pi: Interfacing to the Real World with Embedded Linux*. Indianapolis: Wiley, 2016. ISBN 978-1119188681.
- [2] FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Cham Heidelberg: Springer, 2015. ISBN 978-3319193021.
- [3] KERNIGHAN, Brian W. a Dennis M. RITCHIE. *Programovací jazyk C*. Praha: Computer Press, 2014. ISBN 978-80-251-0897-0.
- [4] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika - senzory, metody, analýza signálu - 4. díl edice Senzory neelektrických veličin*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 978-8073001582.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Slanina, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



doc. Ing. Jiří Koziolek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

30.4.2019 
.....

Datum odevzdání, podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Zdeňku Slaninovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem práce je konstrukce, návrh a implementace smart zařízení pro měření zatížení střech a systému včasného varování. Výsledná měřicí jednotka sestává z odporového tenzometru, jehož analogový výstup je pomocí A/D převodníku HX711 převáděn na 24-bitovou digitální hodnotu, která se dále zpracovává v mikropočítači Raspberry Pi. Zpracovaná data jsou doplněna o aktuální teplotu v místě tenzometru pro kontrolu jeho teplotní závislosti, a odesílána do databáze InfluxDB. Systém varování a monitorování dat je poté obstaráván rozhraním Chronograf. Práce obsahuje také rešerši využití tenzometru pro tento typ měření a popis jednotlivých fází vývoje jmenovaného zařízení.

Klíčová slova

Tenzometr; Raspberry Pi; C; HX711; Ds18b20; Influx; Chronograf

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to design and implement smart device for measuring roof loads and early warning systems. The resulting measurement unit consists of a resistance strain gauge sensor whose analog output is converted to a 24-bit digital value using the HX711 A/D converter, which is further processed in a Raspberry Pi microcomputer. The processed data are supplemented with the current temperature at the strain gauge to check its temperature dependence, and sent to the InfluxDB database. The warning and data monitoring system is then handled by the Chronograph interface. The thesis also includes a research for the use of strain gauge for this type of measurement and a description of the individual phases of development of the mentioned device.

Key Words

Load cell; Raspberry Pi; C; HX711; Ds18b20; Influx; Chronograf

Obsah

Abstrakt	5
Klíčová slova	5
Abstract	5
Key Words	5
Obsah	6
Seznam použitých symbolů a zkratek	8
Seznam ilustrací	9
Seznam tabulek	9
Úvod	10
1 Predikce havarijních stavů střech	11
1.1 Analýza stávajícího řešení	11
1.2 Zatížení střešních konstrukcí	11
1.2.1 Stálé zatížení	12
1.2.2 Nahodilé zatížení	12
1.2.3 Mimořádné zatížení	12
1.3 Druhy tenzometrů	13
1.4 Shrnutí využití tenzometrů pro predikci havarijních stavů střech	14
2 Návrh jednotky pro tenzometr	15
2.1 Odporový kovový tenzometr	15
2.2 Zapojení tenzometru	17
2.3 A/D převodník HX711	18
2.4 Raspberry Pi	19
3 Konstrukce jednotky	20
3.1 Propojení vodičů	21
3.2 Doplnění o teplotní senzor	23
4 Software jednotky	25
4.1 Ovladač pro HX711	25
4.2 Hlavní část programu jednotky s tenzometrem	29
4.3 Knihovna ds18b20	31
4.4 Databáze InfluxDB	33
4.4.1 Chronograf a Kapacitor	34
4.5 Kompilace	35
5 Testování modelu jednotky s tenzometrem	36
Závěr	38

Literatura.....	39
Seznam příloh.....	41

Seznam použitých symbolů a zkratek

A/D	Označení pro převod z analogových hodnot na digitální
API	Application Programming Interface
DPS	Deska Plošných Spojů
FBG	Fiber Bragg Gratings – Optické vláknové mřížky
GPIO	General-Purpose Input/Output
HX711	A/D převodník specializovaný pro tenzometry a podobné aplikace
HTTP	HyperText Transfer Protocol
IO	Označení pro vstupní/výstupní
RJ-45	Nejčastěji používaný typ koncovky pro drátové připojení k internetu
RPi	Obecně používaná zkratka pro Raspberry Pi
SCK	Serial clock
SQL	Structured Query Language
USB	Univerzální sériová sběrnice podporovaná téměř všemi druhy počítačů
VPN	Virtual private network
Wi-Fi	Označení standardů pro bezdrátovou komunikaci v počítačových sítích
curl	Client for URLs

Seznam ilustrací

Obrázek 1 Možnosti umístění odporových tenzometrů při monitorování zatížení střechy	14
Obrázek 2 Změny na vodiči způsobené deformací	15
Obrázek 3 Rozložení vodiče na fóliovém tenzometru	16
Obrázek 4 Schéma zapojení plného Wheatstoneova můstku	18
Obrázek 5 Odporový kovový tenzometr	18
Obrázek 6 A/D převodníkový modul HX711	19
Obrázek 7 Připevnění tenzometru k podložce.....	20
Obrázek 8 Vodiče tenzometru s konektory	21
Obrázek 9 Rozložení GPIO pinů na různých verzích Raspberry Pi [10]	22
Obrázek 10 Schéma zapojení senzoru DS18B20	23
Obrázek 11 Realizace teplotního senzoru DS18B20	23
Obrázek 12 Fyzické spojení Raspberry Pi – HX711 teploměru DS18B20 a tenzometru	24
Obrázek 13 Řízení a zároveň získávání dat z HX711	26
Obrázek 14 Zjednodušený vývojový diagram knihovny hx711.....	28
Obrázek 15 Zjednodušený vývojový diagram hlavního programu jednotky	30
Obrázek 16 Zjednodušený vývojový diagram knihovny ds18b20	32
Obrázek 17 Architektura produktů InfluxData [14]	34
Obrázek 18 Měřicí jednotka s tenzometrem.....	37

Seznam tabulek

Tabulka 1 Normové zatížení budov v jednotlivých sněhových oblastech podle normy ČSN EN 1991-1-3 [4]	12
Tabulka 2 Časování HX711	27
Tabulka 3 Počet pulsů pro nastavení zesílení.....	27
Tabulka 4 Návrhové hodnoty knihovny ds18b20	31

Úvod

V dnešní době se stává internet věcí spolu s tzv. průmyslem 4.0 trendem současné digitalizace. Tato práce se tedy zabývá aktuální problematikou přidávání zařízení do sítě internetu věcí a zpracování dat. Práce dále seznámí čtenáře s problematikou zatížení střešních konstrukcí a s druhy zatížení. Dále bude obsahovat popis principu funkce jednotlivých druhů tenzometrů, a výběr nejvhodnějšího tenzometru pro tento druh měření. Součástí práce bude návrh a realizace jednotky. Výstupem bude funkční jednotka s tenzometrem, použitelná prakticky se všemi velikostmi odporových kovových tenzometrů s konvenčním můstkovým zapojením.

Výsledná jednotka bude použitelná například k monitorování zatížení střešní konstrukce různými vlivy. Práce obsahuje přehled druhů zatížení a možné příčiny havarijních stavů. Dále popisuje princip funkce odporových tenzometrů spolu s jejich zapojením a digitalizace analogových dat z tenzometrů pomocí A/D převodníku s vhodným rozsahem. V neposlední řadě práce zahrnuje popis použitého jednodeskového počítače Raspberry Pi, důvod jeho volby, a jeho funkce v jednotce pro internet věcí. Naměřená data budou odesílána k pozdějšímu zpracování do databáze.

Tato práce mimo jiné spadá do projektu výzkumu Ministerstva průmyslu a obchodu s názvem Výzkum a vývoj progresivních systémů včasného varování dosažených kritických stavů ohrožujících bezpečnost a stabilitu objektů, včetně řešení sanačních opatření na eliminaci vzniklého nebezpečí, označený kódem: ESF OP PIK CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004694. Výsledky práce jsou také využitelné v projektu Vývoj MEMS pro monitoring nestability zemních těles, kód: FV20519.

1 Predikce havarijních stavů střech

Cílem bakalářské práce je vytvořit zařízení, které bude dlouhodobě monitorovat zatížení střešních konstrukcí. V minulosti již mnohokrát došlo ke zhroucení střech nebo střešních konstrukcí z nejrůznějších důvodů. Po každé takové nehodě se pozornost společnosti zaměří právě na tematiku bezpečnosti střech a možnosti předcházení havarijních stavů.

1.1 Analýza stávajícího řešení

Pomineme-li lidský faktor, vady v projekci a nevhodné stavební postupy, patří právě přetížení nebo nerovnoměrné zatížení střešních konstrukcí mezi jednu z nejčastějších příčin havárií střech v České republice.[1] Použitím tenzometrů pro vážení střech a včasným varováním můžeme předejít dosažení mezních stavů únosnosti střech, a účinně tak předcházet havarijním stavům a škodám na majetku.

V současné době monitorování zatížení střech v ČR zatím není příliš obvyklé, spíše se firmy a vysoké školy zabývají měřením zatížení a deformace mostních konstrukcí. Monitorováním zatížení střech se zabývá například firma Safibra s r.o., která využívá optické vláknové FBG senzory. [8].

Dále se monitorováním zatížení střech zabývalo Vysoké učení technické v Brně, které monitorovalo střechu pavilonu D místního výstaviště. Brněnské řešení bylo později použito i na monitorování konstrukce střechy letiště Mošnov. [9] Bohužel bližší nebo aktuální informace nebyly dohledány.

Mimo Českou republiku se monitorováním střešních konstrukcí zabývá například polská firma Sense Monitoring SP. Z O.O., nebo americká firma SRS - Roof Snow Load Alarm Systems.

1.2 Zatížení střešních konstrukcí

Pro predikci havarijních stavů je v první řadě nutné seznámit se s jevy, které mohou ovlivnit bezpečnost. Obecným zatížením konstrukcí se blíže zabývá norma ČSN EN 1991-1-1. Hlavní složkou zatížení, na které jsou navrhovány střešní konstrukce je zatížení sněhem. Z toho důvodu, a také pro jednodušší popis zatížení střešních konstrukcí tato práce využije především třetí části jmenované normy, a to ČSN EN 1991-1-3 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem. Norma ČSN EN 1991-1-3 určuje národně stanovené parametry platné pro území České republiky. Národní příloha obsahuje také mapu sněhových oblastí na území ČR, která stanoví charakteristické hodnoty zatížení sněhem [5].

Mapa sněhových oblastí, viz příloha I, je přílohou normy ČSN EN 1991-1-3. Udává normové zatížení sněhem v daných oblastech. Hodnoty charakteristického zatížení sněhem jsou hodnoty, které mohou být dosaženy, nebo překročeny jednou za 50 let. Normové zatížení v barevně označených oblastech mapy sněhových oblastí blíže popisuje tabulka 1.

Kupříkladu, město Ostrava se podle mapy sněhových oblastí nachází v oblasti II. Podle normových hodnot zatížení z tabulky 1 lze v oblasti II očekávat zatížení sněhem 80 kg/m^2 . Na tuto hodnotu zatížení na metr čtvereční by podle jmenované normy ČSN EN 1991-1-3 měly být projektovány střešní konstrukce v dané oblasti od doby platnosti normy. Předchozí norma ČSN 73 00 35, platná do listopadu 2006, využívala jiného výpočtu charakteristického zatížení, a uvažovala zpravidla s menším zatížením.[7]

Tabulka 1 Normové zatížení budov v jednotlivých sněhových oblastech podle normy ČSN EN 1991-1-3 [4]

	Sněhová oblast	Objemová hmotnost sněhu (kg/m^3)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
	Charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi (kPa)		0,7	1	1,5	2	2,5	3	4	individuální určení
	hmotnost sněhu na střeše určená z charakteristické hodnoty (kg/m^2)		56	80	120	160	200	240	320	individuální určení
Druh sněhu	Čerstvý	100	56 cm	80 cm	120 cm	160 cm	200 cm	240 cm	320 cm	
	Ulehlý (několik hodin nebo dnů po napadnutí)	200	28 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm	160 cm	
	Starý (několik týdnů nebo měsíců po napadnutí)	300	19 cm	27 cm	40 cm	53 cm	67 cm	80 cm	107 cm	
	Mokrý	400	14 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	80 cm	

Zatížení střešních konstrukcí můžeme podle druhu rozdělit na stálé, nahodilé a mimořádné zatížení.

1.2.1 Stálé zatížení

Stálé zatížení střešní konstrukce zahrnuje hmotnost samotné nosné konstrukce, krytiny a dalších součástí střechy. Stálé zatížení působí na konstrukci stejnou intenzitou po celou dobu trvání konstrukce. Tento druh zatížení by neměl představovat žádné riziko pro střešní konstrukce [4].

1.2.2 Nahodilé zatížení

Nahodilé neboli proměnné zatížení působí pouze v některých situacích a mění se v čase. Patří mezi ně zatížení sněhem, ledem, větrem, provozem, anebo stroji. V případě nahodilého zatížení již může v některých situacích docházet k havarijním stavům, jelikož například 1 m^3 sněhu může mít objemovou hmotnost 100 až 400 kg v závislosti na druhu sněhu [4]. K neúměrnému zatížení může dojít například i u rovných střech při zanešení odtokových cest.

1.2.3 Mimořádné zatížení

Mimořádné zatížení se může projevovat ve výjimečných případech jako jsou katastrofální události, například zemětřesení, výbuch, havarijní narušení. Této variantě zatížení se obvykle nedá jednoduše předcházet.

1.3 Druhy tenzometrů

V současné době se lze setkat s velkým množstvím různých druhů tenzometrů, které jsou více či méně vhodné pro měření zatížení střešních konstrukcí. Princip tenzometrů spočívá v měření změny vzdálenosti dvou bodů na povrchu tělesa vlivem jeho zatížení [3]. Nepřímo tedy měří mechanické napětí na povrchu tělesa způsobené jeho deformací.

Strunové tenzometry

Jak již napovídá název, tento druh tenzometru tvoří ocelová struna, která je napjatá mezi dvěma body. Principem je měření vzdálenost těchto dvou bodů od sebe. I s nepatrnou změnou vzdálenosti bodů vlivem deformace, se mění napětí ocelové struny, a tím dochází ke změně vlastního kmitočtu struny. Podobnou změnu frekvence struny je možné pozorovat například i při ladění strunných hudebních nástrojů. Výslednou frekvenci struny vyhodnocuje speciální zařízení, jež strunu vybudí elektrickým impulsem a poté měří dobu trvání N period. Tento druh tenzometru se nejčastěji používá pro měření mechanického napětí, není tak příliš vhodný pro měření zatížení.

Pneumatické tenzometry

Principem tohoto tenzometru je měření změny tlaku plynu uvnitř tenzometru způsobené jeho deformací.

Mechanické tenzometry

Mechanické tenzometry jsou obecně známé spíše jako siloměry. Tyto tenzometry sestávají z pružiny a měřicí ručičky pohybující se po stupnici číslic, v závislosti na typu tenzometru.

Fotoelasticimetrické tenzometry

Jedná se o optické tenzometry označované také jako FBG. Jejich princip spočívá v odrazu světla od Braggovy mřížky. Braggova mřížka má v klidovém stavu rozteč rovnu jedné vlnové délce. Při deformaci tenzometru dojde i k deformaci Braggovy mřížky, a tím i ke změně její rozteče a odražené vlnové délky. Výsledná vlnová délka se vyhodnocuje spektrometrem.

Elektrické tenzometry

Elektrické tenzometry se dělí na indukční, kapacitní, odporové a polovodičové. Jde o nejčastěji používaný typ mezi tenzometry, protože přímo převádí, v tomto případě poměrné prodloužení, na elektrickou veličinu. Podle druhu elektrického tenzometru se se změnou délky mění impedance cívky v případě indukčního tenzometru, nebo kapacita kondenzátoru u kapacitního tenzometru. Odporové tenzometry se dále dělí na polovodičové, uhlíkové a kovové tenzometry.

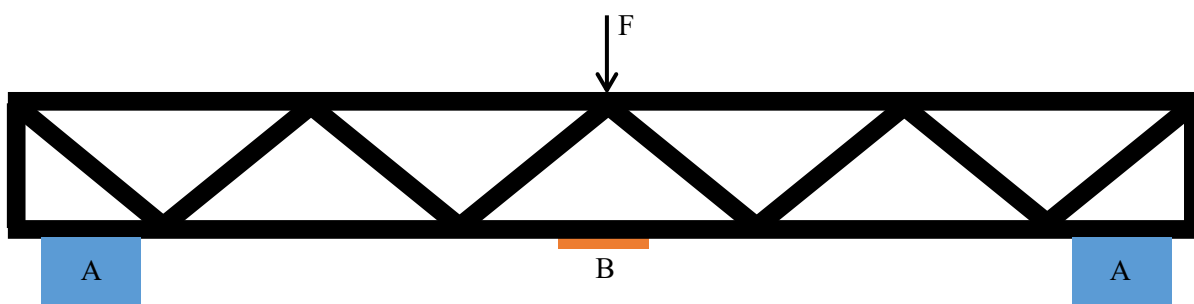
Polovodičový tenzometr využívá tzv. piezorezistence některých materiálů, například křemíku. V závislosti na mechanickém tlaku se tak mění elektrický odpor.

Uhlíkové tenzometry sestávají ze dvou uhlíkových ploch, které jsou na sebe vlivem zatížení přitisknuty a se změnou zatížení se mění i přítlak uhlíkových destiček, tudíž i elektrický odpor mezi nimi. V dnešní době se již tento typ tenzometrů nevyužívá.[3]

Odporový kovový tenzometr je blíže popsán v kapitole 2.1.

1.4 Shrnutí využití tenzometrů pro predikci havarijních stavů střech

Tato práce se zabývá vážením střech pomocí odporových kovových tenzometrů, jelikož mají v tomto směru nejvíce výhod. Mezi klady použití odporových tenzometrů patří jejich dostupnost, pořizovací náklady a malá náročnost při zpracování výstupního signálu. Ve srovnání s polovodičovými tenzometry nabízí odporové menší přesnost, ale pro tento typ využití je přesnost dostačující. Odporové tenzometry můžeme u monitorování střešních konstrukcí využít pro vážení (A) obrázek 1, i pro měření deformace neboli prohnutí střechy způsobené zatížením (B) obrázek 1.



Obrázek 1 Možnosti umístění odporových tenzometrů při monitorování zatížení střechy

Použití odporových tenzometrů podle (A viz obrázek 1) pro měření hmotnosti střešní konstrukce a jejího zatížení. Správným vyhodnocením je možné získat i data o nerovnoměrném zatížení střechy. V této variantě může být využit například tenzometr Zemic HM9B-C3-xxt, kde „xx“ označuje váživost, která se u tohoto výrobku pohybuje mezi 10 až 50 tunami podle zvolené varianty.

Při použití podle varianty (B obrázek 1) je možné monitorovat prohnutí střešní konstrukce. Vlivem hmotnosti působící na střechu se spodní část konstrukce nepatrně prodlužuje. Prodloužení může být detekováno správně upevněným tenzometrem.

S použitím tenzometrů pro vážení střechy je často nutné počítat již při projektování střešní konstrukce. Dále je důležité tenzometry dimenzovat tak, aby nedošlo k překročení jejich váživosti, a tím možnému poškození zařízení.

2 Návrh jednotky pro tenzometr

Tato část práce je zaměřena na návrh jednotky pro tenzometr. Popis návrhu postupuje ve směru, jakým plyne elektrický signál z použitého senzoru, přes zpracování v konkrétním mikropočítači, nebo mikroprocesoru, až po odeslání do databáze na internet.

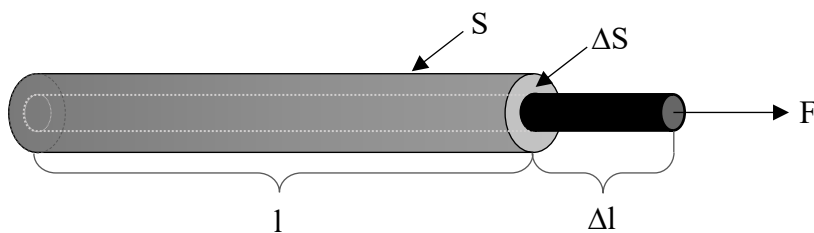
V první řadě je potřeba vybrat vhodný senzor pro vážení střešních konstrukcí, tedy takový, který bude schopný vážení řádově do desítek tun podle hmotnosti střechy se zatížením. Pro tento typ použití se nejlépe hodí odporový kovový tenzometr. Jeho nespornou výhodou je především to, že zapojení tenzometru s vážícím rozsahem do 1 kg je prakticky shodné s tenzometrem s rozsahem v tunách. Proto je možné reálné použití měřicí jednotky simulovat a testovat i v prostorách školy pro tuto bakalářskou práci. Další výhodou odporových kovových tenzometrů je fakt, že se ve většině případů vyrábějí jako kompletní zařízení s vnitřním zapojením pro potlačení negativních okolních vlivů, jako je například teplota.

Pro sestavení jednotky pro odporový tenzometr je důležité znát, jak tenzometr funguje a jaký je jeho výstupní signál. Podle těchto znalostí se zvolí vhodný A/D převodník, a poté zařízení, jež dovede zpracovat výsledný signál.

2.1 Odporový kovový tenzometr

Mezi nejčastěji používané tenzometry v současné době patří odporové kovové a polovodičové tenzometry. Pro realizaci měřicí jednotky byl zvolen odporový kovový tenzometr, především kvůli jeho relativně nízké pořizovací ceně začínající v desítkách korun, přes velmi dobrou dostupnost v různých měřicích rozsazích a v neposlední řadě pro poměrně jednoduché zpracování výstupního signálu při zachování přijatelné přesnosti měření.

Odporový tenzometr je pasivní elektrotechnická součástka, která slouží k převodu neelektrické veličiny na elektrickou. V případě tenzometru se měří deformace měřeného materiálu. Princip tenzometru vychází ze změny délky Δl a změny průřezu ΔS vodiče způsobené mechanickou deformací materiálu, s nímž je tenzometr pevně spojen. Tenzometr přilepený na povrch měřeného objektu se tedy deformuje stejně jako namáhaný objekt. Při natahování vodiče tenzometru silou F se zvětšuje jeho délka l a zmenšuje průřez S viz obrázek 2, a dochází tak ke změně elektrického odporu vodiče.



Obrázek 2 Změny na vodiči způsobené deformací

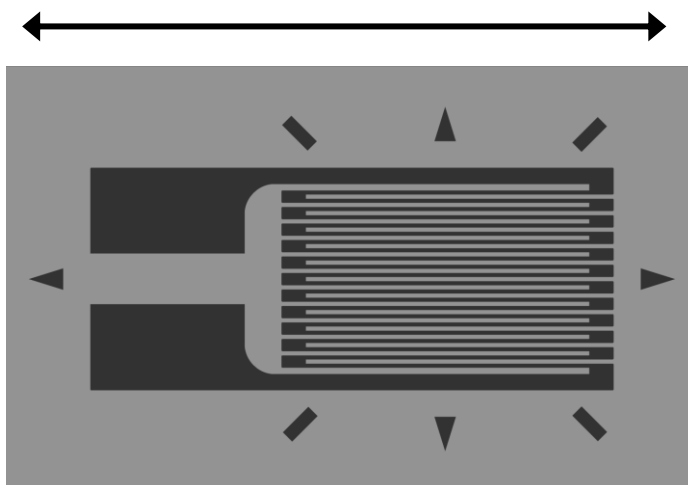
Výsledný jev popsáný na obrázku 2 lze také podložit vztahem (1), který popisuje závislost odporu R vodiče na jeho délce, průřezu a materiálu.

$$R = \rho * \frac{l}{S} \text{ } [\Omega] \quad (1)[16]$$

Kde l představuje délku vodiče, S průřez vodiče s měrným elektrickým odporem ρ .

U kovových odporových tenzometrů je možné zanedbat změnu velikosti měrného elektrického odporu ρ způsobenou mikrostrukturálními změnami materiálu. Změnu měrného elektrického odporu ρ vlivem deformace považujeme za nulovou.

Změna elektrického odporu v jednom vodiči vlivem deformace je příliš malá, a byly by problémy s jejím vyhodnocováním. Z toho důvodu se používá sériové zapojení několika souběžně ložených vodičů viz obrázek 3, jejichž změna odporu se sčítá. V případě odporových tenzometrů se nejčastěji používá vhodně tvarovaná kovová fólie obalená ohebnou izolační vrstvou.



Obrázek 3 Rozložení vodiče na fóliovém tenzometru

Šipka nad obrázkem 3 označuje optimální směr deformace, pro kterou je tento druh fóliového tenzometru určen. Deformace v kolmém směru je nežádoucí. Tvar vodičů je zvolen tak, aby krátké příčné úseky s větším průřezem byly co nejméně citlivé na deformaci kolmou na optimální směr deformace. Výsledný fóliový tenzometr může být použit samostatně a pevně nalepen na měřeném povrchu, nebo nalepen na hotovém deformačním členu, používaném například ve váhách [20].

Změna odporu tohoto vodiče je tedy úměrná deformaci na rovnici (2):

$$\frac{\Delta R}{R} = K * \varepsilon \quad (2)[16]$$

Kde R odpovídá odporu tenzometru při výchozím mechanickém zatížení [Ω]

ΔR je přírůstek odporu tenzometru při zatížení [Ω]

K je konstanta vyjadřující citlivost tenzometru (dle materiálu kovové vrstvy) [-]

ε poměrné prodloužení [%] kdy $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ kde Δl je změna délky vodiče a l je délka vodiče.

Závislost změny odporu na změně deformace u odporových tenzometrů je v daném měřicím rozsahu zpravidla lineární, odpadá tím složité vyhodnocování výstupního signálu.

2.2 Zapojení tenzometru

Odporové tenzometry se obvykle vyrábějí s typickými hodnotami při nezatíženém stavu odpovídajícími standardním řadám odporů, a to 120 Ω , 350 Ω , 600 Ω a 1000 Ω . Změny odporu způsobené deformací jsou však velmi malé, proto je pro zpracování signálu důležité použít přesný A/D převodník. Při měření tenzometry bývá hodnota ovlivněná i teplotou, jelikož i teplota ovlivňuje vodivost materiálu tenzometru, a s tím i elektrický odpor.

Pro závislost elektrického odporu kovového vodiče na teplotě platí vztah na rovnici (3):

$$R = R_{20} * (1 + \alpha * \Delta t) \quad (3)[16]$$

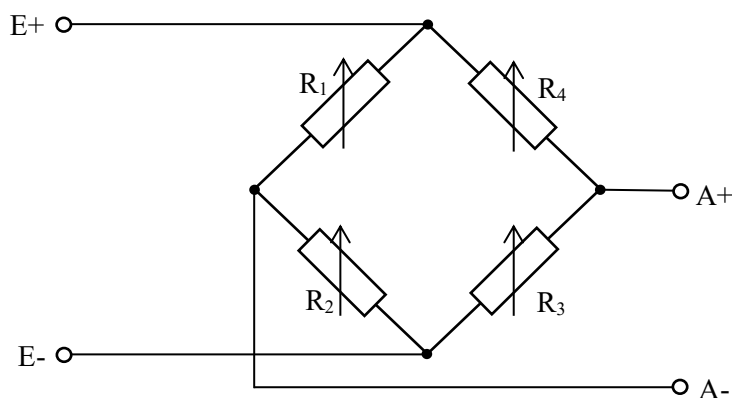
Kde R je odpor vodiče při teplotě t

R_{20} je odpor materiálu vodiče při vztažné teplotě $t = 20$ °C

α je teplotní součinitel elektrického odporu

Δt odpovídá rozdílu teplot $t - t_{20}$

Teplota mimo jiné způsobuje teplotní roztažnost samotného tenzometru. Nejčastější způsob kompenzace vlivu teploty je použití více tenzometrů a jejich spojení do Wheatstoneova můstku. Wheatstoneův můstek může být tvořen čtyřmi tenzometry R_1 až R_4 viz obrázek 4, přičemž některé tenzometry mohou být v můstku nahrazeny pevnými rezistory. Více tenzometrů a popřípadě i pevné rezistory bývají obvykle součástí již hotových běžně vyráběných tenzometrů.



Obrázek 4 Schéma zapojení plného Wheatstoneova můstku

Obrázek 4 zobrazuje schéma zapojení tzv. plného Wheatstoneova můstku, tedy zapojení s použitím tenzometru na každou větev můstku. Tento typ zapojení poskytuje výhody jako čtyřnásobná citlivost, potlačení činitele nelinearity, téměř nulová chyba vlivem teploty a zanedbatelnou chybu vlivem délky přívodů. Vstupy označené E+ a E- představují napájení můstku, tedy i tenzometru samotného. Výstupy A+ a A- pak představují výstupní napětí z tenzometru.

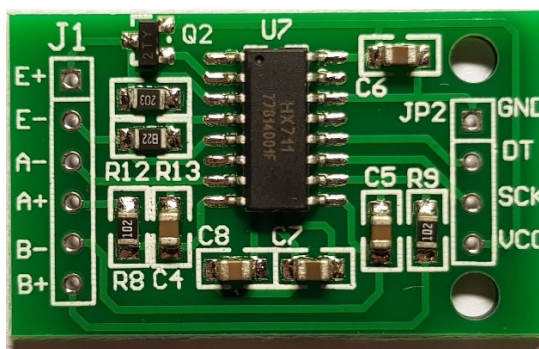


Obrázek 5 Odporový kovový tenzometr

2.3 A/D převodník HX711

HX711 je 24bitový převodník z analogového na digitální signál vyráběný v šestnácti-pinovém pouzdru označovaném SOP-16L. Podle použitého A/D převodníku je pojmenován i celkový převodníkový modul viz obrázek 6. Integrovaný obvod HX711 je přímo určený pro vážení a průmyslové aplikace s můstkovým zapojením. Na vstupu integrovaného obvodu je vstupní multiplexor, který přepíná mezi kanálem A nebo B [15]. Za multiplexorem se nachází nízko-šumový PGA zesilovač s programovatelným ziskem 32, 64, nebo 128 dB, odpovídajícím diferenciálnímu vstupu v plném rozsahu napětí ± 20 mV nebo ± 40 mV při napájení 5 V. HX711 je schopný pracovat při napájení v rozsahu 2,7 až 5,5 V [15], což je optimální pro použití s Raspberry Pi, jelikož GPIO piny Raspberry Pi podporují pouze 3,3 V logiku [10].

A/D převodník HX711 pracuje na principu tzv. Sigma-Delta ($\Sigma - \Delta$). Sigma-Delta převodníky umožňují dosáhnout velmi vysoké linearity při rozlišení až 24 bitů, tj. až 16777216 úrovní. Analogová část převodníku obsahuje komparátor, zdroj referenčního napětí, jeden nebo více integrátorů a obvody pro slučování analogových signálů. Převodníky Sigma-Delta využívají k digitalizaci několikanásobně vyšší vzorkovací frekvenci, než je Nyquistův kmitočet. Získávají tak vysoký počet vzorků, který následně redukuje filtrováním a průměrováním [17]. Na digitálním výstupu DOUT je tedy zprůměrovaný číslicový n-bitový údaj převzorkovaný na kmitočet daný hodinovým signálem [15]. Hodinový signál může být přiveden z externího zdroje, nebo lze využít vnitřního oscilátoru v integrovaném obvodu. V této práci je hodinový signál přiveden na pin SCK z Raspberry Pi.



Obrázek 6 A/D převodníkový modul HX711

2.4 Raspberry Pi

Myšlenka malého levného počítače Raspberry Pi původně vznikla na Cambridgeské univerzitě jako zábavná forma vzdělávání v oblasti informatiky. Je to malý jednodeskový počítač výkonově srovnatelný se slabším stolním počítačem. Na desce obsahuje všechny nejdůležitější konektory pro používání jako běžný počítač. Postupem času přišly i výkonnější verze Raspberry Pi, a tím se změnila i cílová skupina uživatelů tohoto počítače. V současnosti se s Raspberry Pi můžeme setkat i u sofistikovanějších projektů, jako řízení inteligentních domů, měřicí jednotky pro internet věcí a mnoho dalších [18], [21].

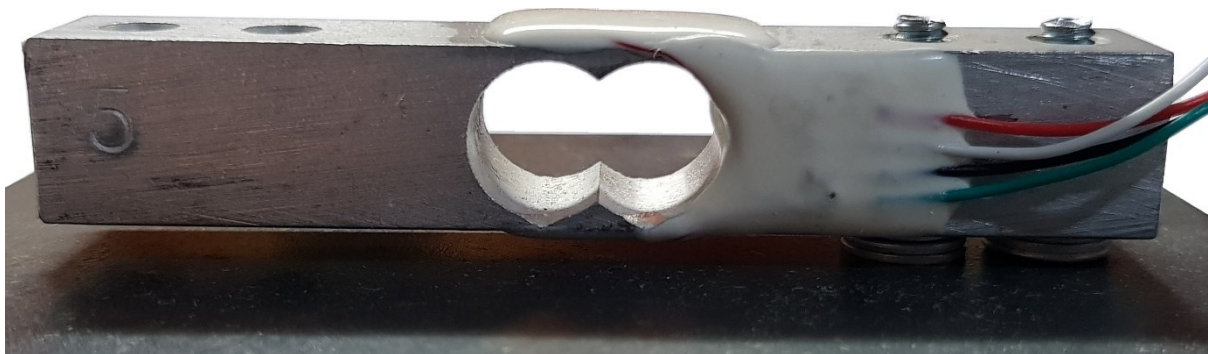
Mikropočítač Raspberry Pi je daleko vhodnější pro vytváření modelů různých zařízení než samotné mikroprocesory. Výhodou oproti mikroprocesorům je, že Raspberry Pi dovede pracovat samostatně a není potřeba k němu v našem případě přidávat další rozšiřující karty například k připojení k síti internet. Raspberry Pi obsahuje všechny důležité součásti k využití jako měřicí jednotka pro internet věcí, kromě A/D převodníku. Pro tuto práci bylo původně vybráno Raspberry Pi model B revize 2.1, které by pro hotový projekt bylo sice dostačující, nicméně na programování s použitím grafického uživatelského prostředí a následné testování jednotky, bohužel postrádá výkon. V průběhu práce se tedy přešlo na výkonnější RPi 3 Model B.

3 Konstrukce jednotky

Jak již bylo popsáno v předchozích částech této bakalářské práce, je pro konstrukci jednotky využito odporového tenzometru, A/D převodníku a mikropočítače Raspberry Pi.

V první řadě byl pořízen odporový tenzometr s váživostí do 5 kg, což je dostačující pro testování vytvářené měřicí jednotky. Zatížení tenzometru nikdy nesmí překročit jeho váživost, poněvadž by mohlo dojít k jeho poškození. Tento konkrétní tenzometr je na obrázku 5. Pro správnou funkci odporového tenzometru je nutné jej vhodně upevnit ve správné orientaci, kterou zpravidla udává šipka na hliníkové deformační části tenzometru, nebo podle pokynů v datasheetu¹ od výrobce daného zařízení. Šipka vyrytá nebo natištěná na tenzometru musí směřovat směrem dolů, jinak by se tenzometr zatížením deformoval ve špatném směru a mohlo by dojít k jeho nevratnému poškození nebo chybnému vážení.

Pro zajištění jednoduššího upevnění tenzometrů k podložce je výrobci opatřují otvory se závity, v našem případě se závitem pro šroub M4. Jako základna pro tenzometr je použitý plochý ocelový profil o síle 3 mm, jelikož je nutné, aby se vlivem zatížení nekroutil a neovlivňoval tím výsledky měření. Rozměry pásoviny jsou přibližně 10 x 10 cm. Spojení ocelové pásoviny a tenzometru je provedeno pomocí dvou šroubů M4 se zápustnou hlavou pro zachování rovné plochy zespod ocelového profilu. Mezera mezi tenzometrem a pásovinou je zajištěna plochými podložkami taktéž M4. Obrázek 7 zobrazuje připevnění tenzometru ke kovové podložce k zajištění stability při vážení. Pro testování jednotky je tento druh připevnění dostačující, jelikož horní plocha tenzometru je dostatečně velká k uložení závaží.



Obrázek 7 Připevnění tenzometru k podložce

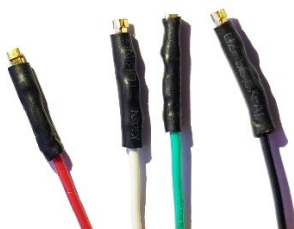
¹ Datasheet – [česky katalogový list] jde o dokument ve kterém jsou uvedeny technické charakteristiky výrobku.

Pripevněný tenzometr, jak jej zobrazuje obrázek 7, je fyzicky připraven k použití, dále je potřeba jej připojit na napájení, které může podle datasheetu¹ dosahovat až 15 V. V tomto případě bude ale napájecí napětí výrazně menší, a to 3,3 V, protože tenzometr bude napájen z mikropočítače Raspberry Pi, jehož vstupy GPIO snesou maximálně 3,3 V. Při napájení napětím pouze 3,3 V se musí očekávat, že výchylka výstupního napětí způsobená změnou odporu tenzometru bude velice malá. To znamená, že pokud bychom chtěli vážit s rozlišením 0,1 gramu, při váživosti tenzometru 5 kg tedy 5000 g, potřebovali bychom výstupní napětí rozdělit alespoň na 50000 úrovní.

$$N = \frac{\text{váživost [g]}}{\text{rozlišení [g]}} = \frac{5000}{0,1} = 50000 \quad (4)$$

Pokud bychom podle výpočtu na rovnici (4) dimenzovali použitý A/D převodník, musel by být minimálně 16-ti bitový. Takový A/D převodník by měl tedy $2^{16} = 65536$ úrovní. Pro tuto práci byl pro dostatečné rozlišení zvolen 24-bitový A/D převodník HX711, blíže popsáný v kapitole 2.3. Výhodou tohoto převodníku je skutečnost, že je primárně určený pro použití s tenzometry, a obsahuje i vnitřní zesilovač.

A/D převodník HX711 sestává z jedné desky plošných spojů o rozměrech cca 24 x 16 mm, viz obrázek 6. Pro připojení tenzometru a Raspberry Pi jej bylo nutné osadit kolíkovými lištami a připájet. Tento druh připojení byl zvolen namísto pevného spojení cínem kvůli možnosti připojení a testování jiných tenzometrů, nebo výměně vodičů. Stejně jako DPS A/D převodníku bylo nutné vhodnými konektory doplnit i přívody tenzometrů. Na tenzometr byly zvoleny kabelové zakončovací dutinky, které byly pro vyšší odolnost tenkých vodičů, a proti nežádoucímu spojení kontaktů a následného zkratu, doplněny smršťovacími bužírkami viz obrázek 8.



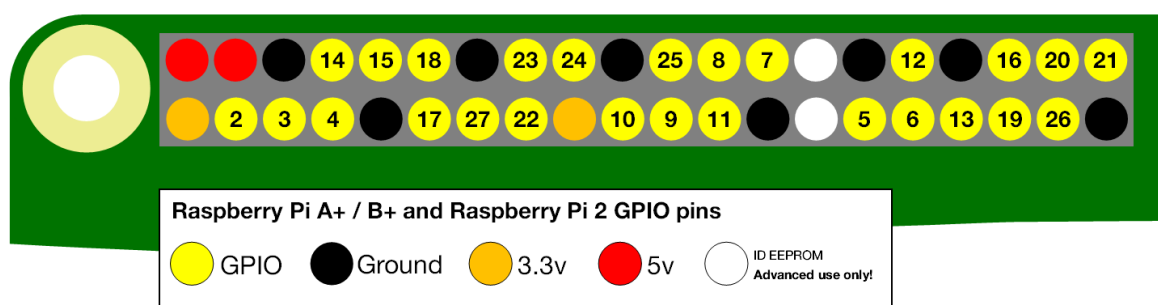
Obrázek 8 Vodiče tenzometru s konektory

3.1 Propojení vodičů

Po doplnění A/D převodníku a tenzometru vhodnými konektory je třeba je správně propojit. Popis jednotlivých vodičů je v datasheetu daného tenzometru. Barevné označení vodičů odporových tenzometrů bývá většinou shodné, rozdílem někdy bývá počet vodičů, dodávají se čtyřmi nebo šesti vodiči. Zapojení se čtyřmi vodiči sestává z červeného, černého, zeleného a bílého vodiče, kde červený a černý představují napájení, kladný E+ a záporný E- pól. Výstup z tenzometru je vyveden zeleným vodičem pro A+ a bílým pro A-.

V případě šestivodičového zapojení jsou napájecí vodiče E+ a E- vyvedeny z tenzometru dvakrát, pro možnost zapojení s kompenzací úbytku napětí na vedení. Princip spočívá v odměřování skutečného napětí na vstupu můstku a zdroj poté může napětí zvýšit na potřebnou úroveň. V této bakalářské práci je použitý pouze čtyřvodičový tenzometr s krátkým vedením, proto se kompenzací úbytku napětí nezabývá. Připojení vodičů tenzometru k A/D převodníku se řídí popisky vytištěnými přímo na jeho DPS, pro lepší parametry je k připojení zvolen kanál A. Kanál A A/D převodníku nabízí možnost nastavení velikosti zesílení vstupního signálu.

Propojení A/D převodníku a mikropočítače Raspberry Pi je zajištěno pomocí zakoupeného čtyřvodičového kabelu s dutinkovým zakončením na obou koncích. Napájení A/D převodníku je zajištěno z GPIO konektoru umístěného na desce Raspberry Pi. Jelikož tento mikropočítač nepodporuje 5V logiku, musí se A/D převodník napájet pouze z 3,3 V pinu na konektoru GPIO. Pro připojení signálových vodičů byly vybrány GPIO piny s označením GPIO 23 a GPIO 25, toto označení pinů je, jak se později vysvětlí, velice zavádějící, jelikož fyzicky jde o piny s čísly 16 pro GPIO 23 a 22 pro GPIO 25. Výhodou řešení Raspberry Pi je, že stejné GPIO piny lze využít u všech současně vyráběných verzí. Odpadá tak nutnost měnit čísla a nastavení pinů v programu.



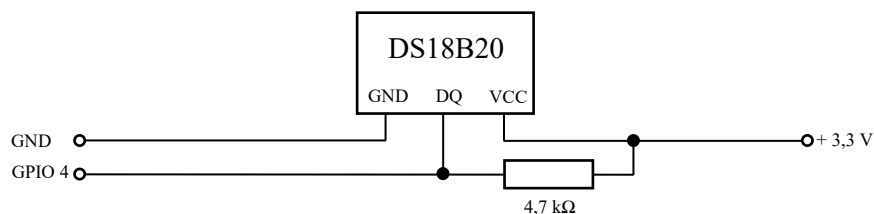
Obrázek 9 Rozložení GPIO pinů na různých verzích Raspberry Pi [10]

Obrázek 9 zobrazuje rozmístění pinů GPIO na desce RPi. Fyzické číslování pinů je určeno sudými čísly vzestupně pro horní řadu pinů a lichými vzestupně pro spodní řadu pinů GPIO. Obrázek 9 představuje rozmístění pinů všech Raspberry Pi, pouze starší modely RPi mají GPIO konektory pouze s 26-ti piny namísto zobrazených 40-ti. Funkce a číslování pinů s 26-ti pinovou verzí jsou ale shodné.

Pro funkci Raspberry Pi je samozřejmě nutné jej připojit na napájecí zdroj s napětím ideálně 5,1 V a doporučeným proudem 1 A pro starší verze a dokonce 2,5 A pro novější a výkonnější verze. Zdroj je možné připojit přes mikro USB konektor nebo přes patřičné GPIO piny. Dále, jelikož se předpokládá odesílání naměřených dat do databáze, musí být Raspberry Pi připojeno k internetu. U prvního použitého RPi B lze využít pouze konektor RJ-45 dostupného na desce mikropočítače. Raspberry Pi 3 Model B, používané později, již obsahuje i možnost připojení přes Wi-Fi.

3.2 Doplnění o teplotní senzor

V průběhu tvoření této práce a pozdějšího testování měřicí jednotky vyplynula myšlenka, že by bylo dobré zahrnout do zpracovávaných dat i hodnoty aktuální okolní teploty pro ověření teplotní závislosti tenzometru. Jelikož mikropočítač Raspberry Pi v základním sestavení neobsahuje vestavěný A/D převodník, byl vybrán digitální teplotní senzor MAXIM DS18B20, spíše známý jako Dallas. Měřicí rozsah tohoto teplotního senzoru je od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ [11], takže plně dostačuje pro měření v běžných podmínkách. DS18B20 je senzor vyráběný v pouzdru TO-92 se třemi vývody a pro správnou funkci musí být doplněn rezistorem $4,7\text{ k}\Omega$ zapojeným mezi digitálním výstupem a napájecím vodičem viz obrázek 10.



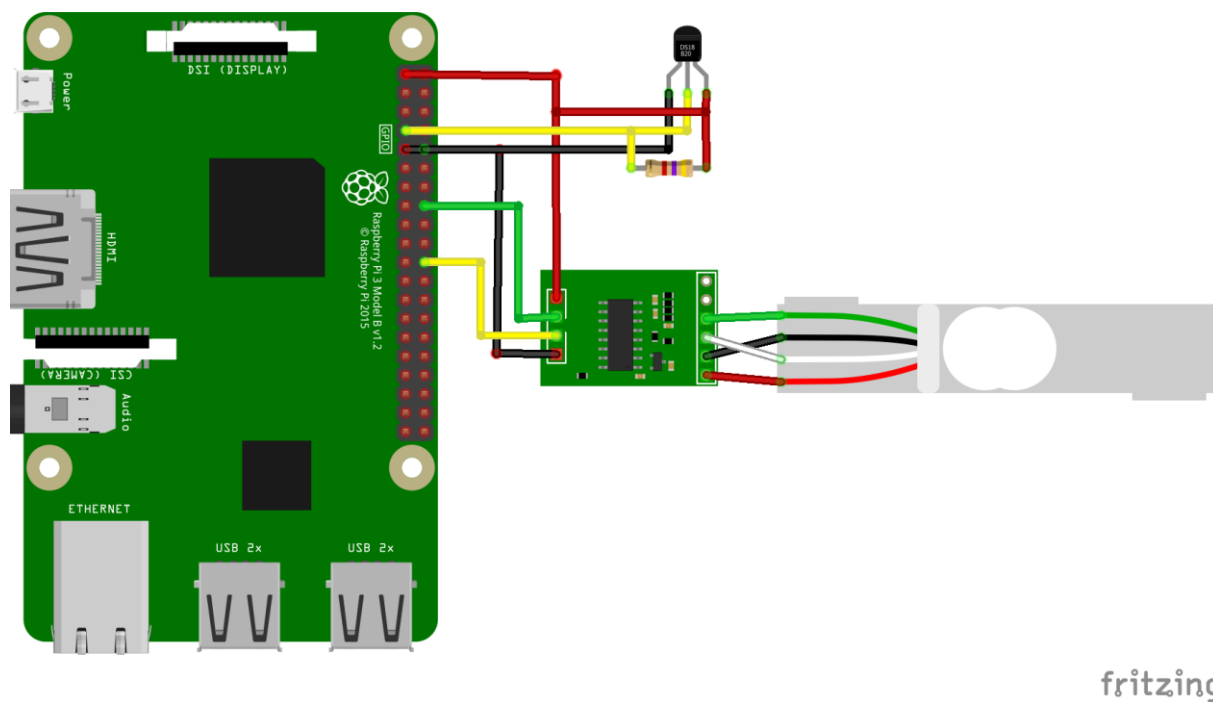
Obrázek 10 Schéma zapojení senzoru DS18B20

Ze schématu, které vyobrazuje obrázek 10 je také patrné, že digitální výstup senzoru je připojen na pin GPIO 4 mikropočítače RPi stejně jako napájecí vodiče na piny 3,3 V a GND. Aby nebylo potřeba vytvářet novou desku plošných spojů osazenou pouze jedním rezistorem, je rezistor připájen přímo k senzoru DS18B20. Celá část se spoji je nakonec zakryta teplem smrštitelnou bužírkou viz obrázek 11. Konektory od teplotního senzoru jsou stejně jako konektory tenzometru opatřeny dutinkovým zakončením a opět překryty smršťovací bužírkou.



Obrázek 11 Realizace teplotního senzoru DS18B20

Celá jednotka je tedy složena z mikropočítače Raspberry Pi, A/D převodníku HX711 a teplotního senzoru Maxim DS18B20 viz obrázek 12. K jednotce se podle datasheetu konkrétního výrobce připojí elektrický odporový tenzometr. Předpokládaným výstupem z jednotky je především databáze naměřených dat dostupná z internetu, pro samotný chod jednotky není tedy nutné mít k Raspberry Pi připojený monitor, klávesnici a myš.



Obrázek 12 Fyzické spojení Raspberry Pi – HX711 teploměru DS18B20 a tenzometru

4 Software jednotky

Mikropočítače Raspberry Pi podporují chod na mnoha různých operačních systémech. V případě této bakalářské práce bylo však použito Raspberry Pi model B, ovšem jak se později ukázalo, pro chod databáze a jejího monitorování mělo příliš malý výkon. Proto bylo při další práci použito především RPi 3 model B s operačním systémem Raspbian GNU/Linux 8.0 jessie.

Jako první krok k napsání této práce bylo nutné ověřit, zda je A/D převodník HX711 navrhnutý pro použití k tomuto úkolu vhodný. Jelikož se HX711 běžně používají pro tenzometry s rozsahem do 1, 2 a 5 kg bylo nutné vyzkoušet kompatibilitu modulu HX711 s tenzometrem s rozsahem do 100 kg. Testování probíhalo nejjednodušším možným postupem, a to použitím jednodeskového počítače Arduino, které má mnoho uživatelů a není proto problém získat hotové knihovny pro práci s A/D převodníkem HX711. Po krátkém testování se ukázalo, že HX711 je schopný pracovat i s většími tenzometry, a je tedy vhodný.

4.1 Ovladač pro HX711

Prvním plánem při vytváření ovladače pro HX711 bylo využití volně dostupné knihovny pro tento převodník napsané v jazyku Python. To ale obnášelo instalaci samotného Pythonu ve správné verzi. Jakmile byl Python úspěšně nainstalován, nastala potíž se spuštěním samotného ovladače kvůli chybějícím knihovnám. Skrze chybějící knihovny a množství navazujících problémů toto řešení nebylo použito.

Dalším řešením pro získání dat z tenzometru pomocí A/D převodníku HX711 mělo být použití modulu HX711 k jádru Linuxu. Moduly jádra jsou vlastně něco jako ovladače k hardwaru, jak jsou známy z MS Windows. Jelikož první použité Raspberry Pi nemělo nainstalované ani uživatelské prostředí a celý postup se prováděl pouze v příkazové řádce, byla práce se získáváním modulu opravdu zdoluhavá. Po získání kýženého modulu nastal problém s jeho zavedením do jádra systému, poněvadž nebylo vytvořeno pro jádro nainstalované v RPi. Po neúspěšném pokusu o překompilování modulu, byla tato varianta opuštěna.

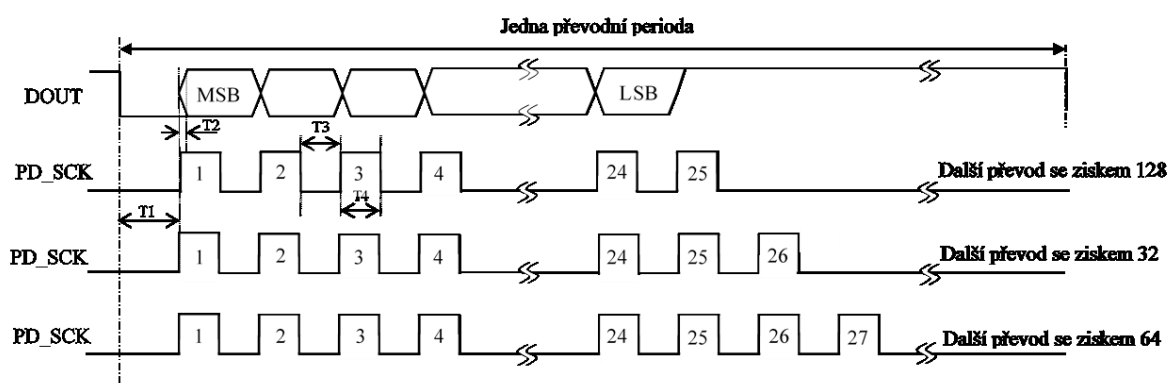
Třetí varianta pro navázání komunikace s převodníkem vycházela taktéž z použití již dříve vytvořené knihovny a programu pro zpracování dat. Po stažení programu a knihovny, a následném zkompilování zdrojového souboru a spuštění, bylo výstupem programu šestimístné číslo představující surovou hodnotu z převodníku. Tato surová hodnota se jevila jako stabilní a výrazně se neměnila v čase. Navíc se podle očekávání zvyšovala při přiložení závaží na tenzometr, a i při stálém zatížení zůstávala téměř stabilní s minimálními výchyly.

Při použití jiného modelu Raspberry Pi se ale ukázalo, že tento program, i když zdánlivě správně fungující, nebude možné použít. Cílem totiž bylo vytvořit program, který bude možné použít na více zařízeních Raspberry Pi. Problémem tohoto programu byla použitá knihovna „*gb_common*“, která je primárně určena pro rozšiřující IO desku Gertboard připojitelnou k Raspberry Pi ke zvýšení počtu vstupů a výstupů mikropočítače. Přestože je samotná rozšiřující deska Gertboard i jmenovaná knihovna „*gb_common*“ kompatibilní se všemi mikropočítači rodiny Raspberry Pi, tak tento program pro komunikaci s HX711 nelze použít pro novější modely RPi. Důvodem je skutečnost, že mezi modely Raspberry Pi 1 a 2, došlo ke změně adresování periférií použitých ARM procesorů.

V důsledku nejde o velký problém, stačí ve zdrojovém souboru „*gb_common.c*“ přepsat adresu periférií z výchozí hodnoty v konstantě *BCM2708_PERI_BASE* z adresy 0x20000000 platné pro původní Raspberry Pi na hodnotu 0x3F000000 pro RPi 2 a 3 [12]. Po úpravě adresování ovšem bylo nutné přeprogramovat celé časování programu, poněvadž nové ARM procesory pracují na vyšším taktu. Takový zásah do programu už by náročností odpovídal vypracování celého programu od začátku, proto i od této verze bylo nakonec upuštěno.

Po stažení již několikrát víceméně nepoužitelné verze programu ke komunikaci s převodníkem, bylo jasné, že pokoušet se o opravení cizích programů by bylo velmi zdlouhavé a s nejasným výsledkem. Jediným schůdným řešením, které se v dané situaci nabízelo, bylo vytvořit ovladač pro A/D převodník HX711 celý od základu nový. Napsání celého programu od začátku přináší výhody v možnosti výběru programovacího jazyku a výsledný program je oproštěn od všech nepotřebných součástí, které by v budoucnu mohly dělat potíže. Pro vypracování programu ke komunikaci s A/D převodníkem byl vybrán programovací jazyk C, s využitím knihovny *wiringPi*, která v mnohém usnadňuje práci s GPIO mikropočítače Raspberry Pi. Malou nevýhodou této knihovny je skutečnost, že využívá své vlastní číslování pinů na konektoru GPIO, které nesouhlasí s číslováním pinů od výrobce RPi. Pomocí příkazu „*gpio readall*“ v příkazové řádce se ale zobrazí přehledná tabulka s popisem všech pinů GPIO se všemi druhy číslování pinů.

Jak už bylo zmíněno dříve, HX711 komunikuje na svém vlastním komunikačním protokolu. Naštěstí výrobce převodníku HX711, Avia semiconductor poskytuje nezvykle podrobný datasheet s detailním popisem principu komunikace s převodníkem. Komunikace funguje na jednoduchém principu, kdy převodník oznámí, že není zaneprázdněný pomocí nastavení pinu DOUT do logické 0, a poté přijímá na pinu označeném PD_SCK. Například počtem pulsů na PD_SCK se určí jaké zesílení má převodník nastavit pro následující převod, přičemž při každém pulsu převodník odpovídá bity převedené hodnoty v pořadí od nejdůležitějšího bitu, pomocí vodiče DOUT viz obrázek 13. PD_SCK tedy slouží jako vstup hodinového signálu. Nastavením PD_SCK na logickou 1 na dobu delší než 60 μ s dojde k resetu převodníku.



Obrázek 13 Řízení a zároveň získávání dat z HX711

Při vytváření programu pro práci s převodníkem HX711 je důležité dbát na správné časování, které je dáno v datasheetu. Na obrázku 13 jsou vyznačena místa **T1** – **T4**, kde je nutné dodržet časování. Rozsahy časů **T1** – **T4** předepsané datasheetem udává tabulka 2.

Tabulka 2 Časování HX711

Ozn.	Popis	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
T ₁	Mezi sestupnou hranou DOUT a vzestupnou PD_SCK	0,1			μs
T ₂	Doba odezvy DOUT na vzestupnou hranu PD_SCK			0,1	μs
T ₃	Délka logické 1 signálu PD_SCK	0,2	1	50	μs
T ₄	Délka logické 0 signálu PD_SCK	0,2	1		μs

Program je sestaven z několika funkcí. Hlavní funkce se nazývá *hx711_Read* a přijímá parametr GAIN, jímž se udává, jaký zisk bude mít následující převodní perioda převodníku. Jelikož jde o 24-bitový A/D převodník, dá se předpokládat, že k přenesení celé 24-bitové informace je potřeba na převodník vyslat 24 pulsů pomocí PD_SCK viz obrázek 13. Po odeslání 24 pulsů, a zároveň přijetí 24 bitů naměřené hodnoty z převodníku, se musí odeslat další jeden až tři pulsy k určení zisku pro další převodní periodu. Počet pulsů pro jednotlivá zesílení udává tabulka 3. Parametr GAIN funkce *hx711_Read* tedy udává počet pulsů navíc k základnímu počtu 24 pulsů. V případě této bakalářské práce může nabývat pouze hodnot 1 nebo 3, protože 26 pulsů by nastavilo další převod pro kanál B, který zde není využitý.

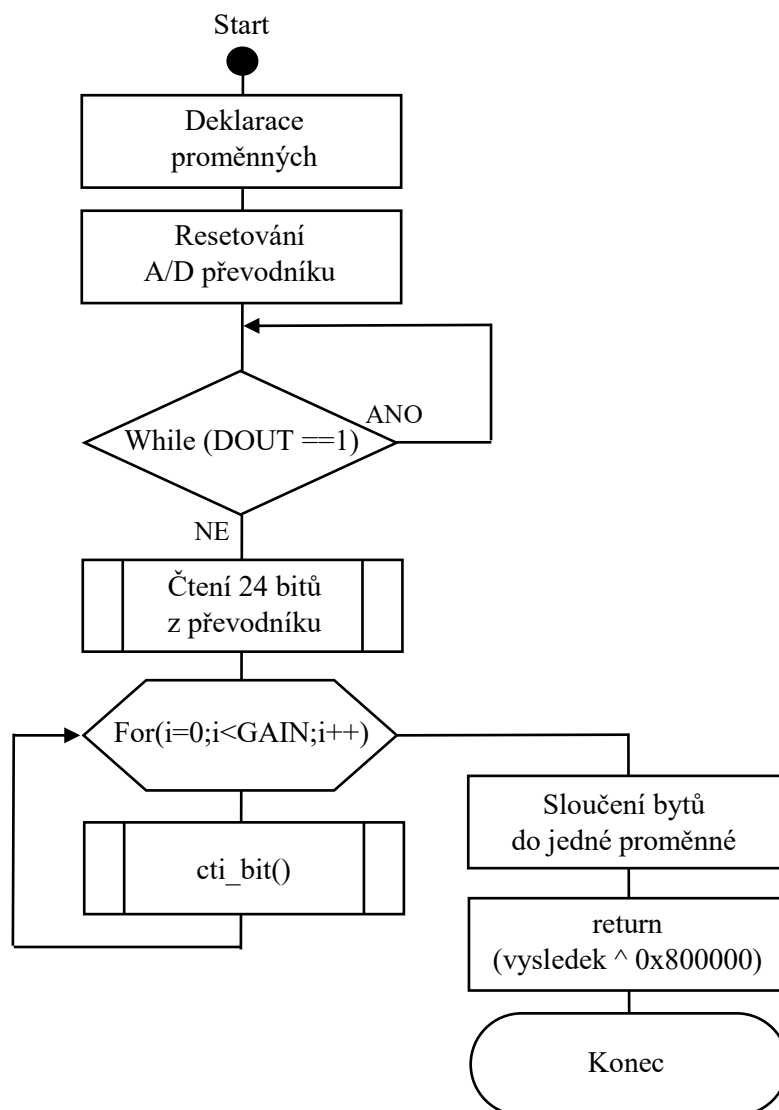
Tabulka 3 Počet pulsů pro nastavení zesílení

Počet PD_SCK pulsů	Vstupní kanál	Zisk
25	A	128
26	B	32
27	A	64

Součástí funkce *hx711_Read* je resetování A/D převodníku, které probíhá po každém volání této funkce. Po resetování A/D převodníku program čeká, až bude převodník připraven na komunikaci. Je-li převodník zaneprázdněn, má nastavenou hodnotu na výstupu DOUT na logickou 1. V opačném případě může program započít komunikaci vysíláním pulsů pomocí vodiče PD_SCK. Program je napsán tak, že nejdříve jednotlivé bity sloučí do tří jednobytových proměnných, které posléze spojí v jednu proměnnou typu long. Datový typ proměnné je zvolen jako long, jelikož 24-bitová hodnota obsahuje číslo 2^{24} , tj. 16777216, pro kterou by datový typ int byl nedostatečný.

Výstupní 24-bitová hodnota opět reagovala podle očekávání na změnu velikosti závaží, ovšem po dosažení určité meze zatížení se skokově změnila. Po rozsáhlém zkoumání problému bylo zjištěno, že za změnu hodnoty může první byt. Nezbyvalo než znovu od začátku projít celý program a kontrolovat jednotlivé kroky podle datasheetu. Nakonec se ukázalo, že A/D převodník výstupní hodnotu kóduje jako tzv. Dvojkový doplněk, což znamená, že první bit příchozí zprávy neobsahuje data, nýbrž pouze označení je-li hodnota kladná nebo záporná. Celá příchozí hodnota se tedy musí pomocí exkluzivního logického součtu XOR přepočítávat na hodnotu správnou. Paradoxně to ale znamená, že HX711 není 24-bitový převodník, když výstupní data obsahují pouze 23-bitovou hodnotu.

Po následné kontrole hodnoty konečně měly požadované vlastnosti – tedy že surová hodnota z převodníku zůstávala stabilní a měnila se přímo úměrně s přiloženým závažím na tenzometru. Pro zajištění přehlednosti programu bylo rozhodnuto, že se již hotový program komunikace s převodníkem bude používat jako samostatná knihovna *hx711*, která se pouze přiloží do hlavního programu obsahujícího další kroky zpracování dat. Obrázek 14 zobrazuje zjednodušený vývojový diagram knihovny *hx711* starající se o vyčtení dat z A/D převodníku.



Obrázek 14 Zjednodušený vývojový diagram knihovny *hx711*

4.2 Hlavní část programu jednotky s tenzometrem

Hlavní program pro jednotku s tenzometrem se skládá ze dvou funkcí, a to funkce „main“ a funkce „odeslat“. Funkce „main“ se v první řadě stará o přepočtení surové hodnoty z A/D převodníku na hodnotu v jednotkách SI. První ideou k řešení přepočtu bylo násobení každé surové hodnoty předem vypočtenou konstantou. Toto řešení se brzy ukázalo jako nevhodné, jelikož po několikátém spuštění již hodnoty neodpovídaly hmotnostem přiložených závaží. Rozdíly se projevovaly také při použití tenzometru s jiným rozsahem. Bylo tedy potřeba, aby hlavní program vypočítával konstantu, kterou se surová hodnota násobí, sám. Pomocí několika pokusů s přepočty v excelu vyšlo jako nejjednodušší řešení vyzvat uživatele po spuštění programu ke kalibraci váhy závažím o známé hmotnosti, a tu posléze zadat do programu. Pro jednodušší popis funkce kalibrace a celého hlavního programu je tato práce doplněna vývojovým diagramem hlavního programu viz obrázek 15.

Postup výpočtu hmotnosti

- 1) Výpočet rozdílu surové hodnoty bez závaží se surovou hodnotou se známým závažím (5)

$$\text{rozdl} = \text{hodnota se závažím} - \text{hodnota bez závaží} \quad (5)$$

- 2) Výpočet násobitele (6)

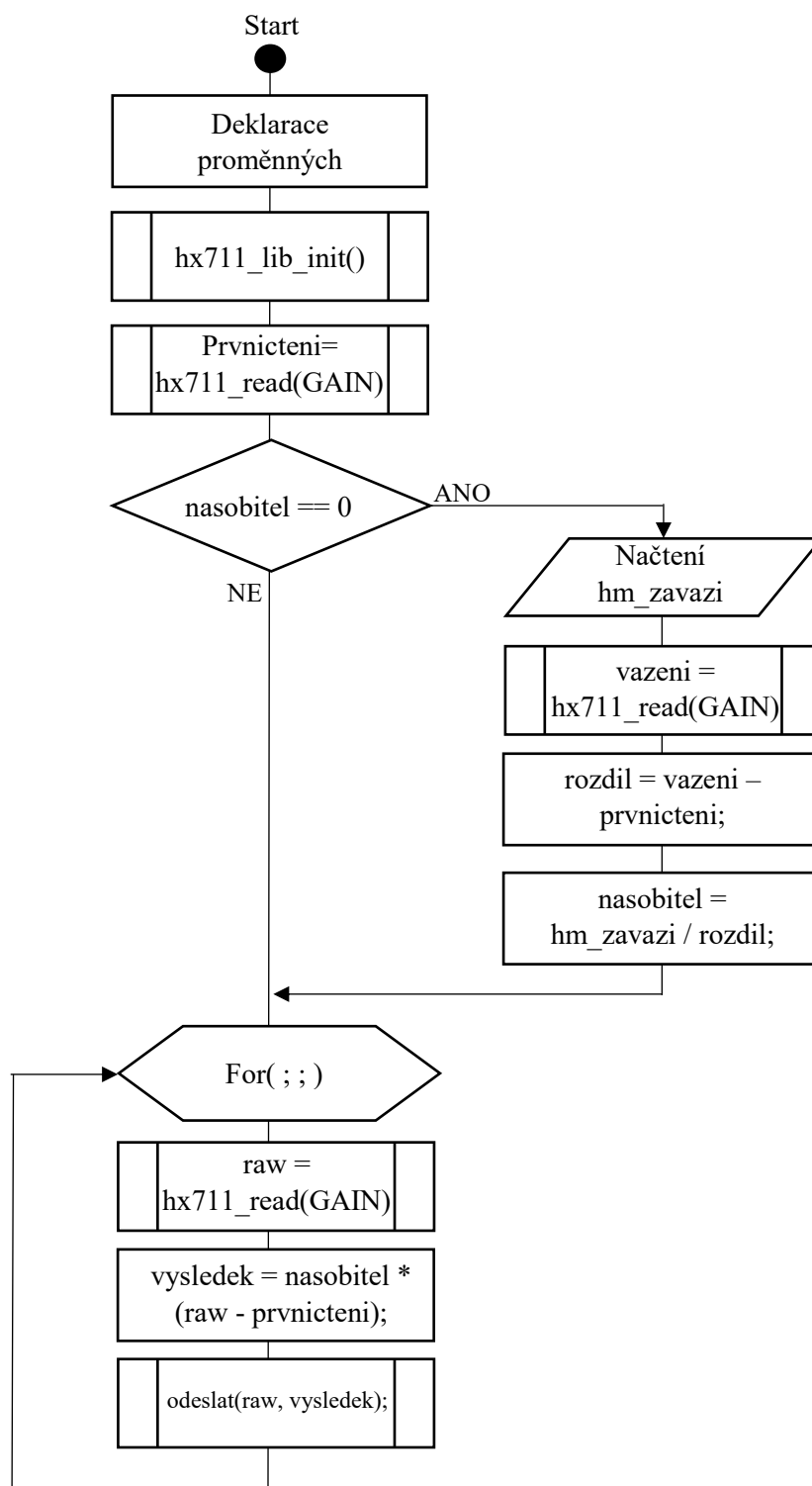
$$\text{násobitel} = \frac{\text{hmotnost závaží}}{\text{rozdl}} \quad (6)$$

- 3) Výpočet výsledné hmotnosti (7)

$$\text{hmotnost} = \text{násobitel} * (\text{surová hodnota z váhy} - \text{hodnota bez závaží}) \quad (7)$$

Přepočtení surové hodnoty na hmotnost je navržen takovým způsobem, aby výsledná hmotnost byla v jednotkách, které byly použity při kalibraci. Je-li při kalibraci zadána hmotnost závaží v gramech, pak je zobrazovaná hmotnost také v gramech. To samé platí i pokud je hodnota zadána v kilogramech, tunech nebo například i v librách. Pro výslednou hmotnost je zvolen datový typ Float podporující zobrazení hodnot s dostatečnou přesností. Dále, po výpočtu násobitele, následuje smyčka For obsahující volání knihovny `hx711` a násobení vrácenou hodnotu s konstantou z proměnné „*násobitel*“, podle třetího vzorce uvedeného výše. Jelikož je cílem práce jednotka s tenzometrem určená pro dlouhodobé měření, smyčka For v programu nemá definovaný počet opakování – měření se tedy opakuje, dokud není zastavené uživatelem. Součástí jmenované smyčky je také volání funkce „odeslat“ určené k odesílání dat do zvolené databáze. Volba a užití databáze jsou dále popsány v kapitole 4.4 Databáze InfluxDB.

Funkce „odeslat“ má dva parametry, jimiž přijímá surovou hodnotu z HX711 a již přepočtenou hmotnost v zadaných jednotkách. Jak již napovídá název, funkce zprostředkovává odesílání dat do databáze. Obsah této části programu je blíže popsán v kapitolách 4.3 Knihovna `ds18b20` a 4.4 Databáze InfluxDB.



Obrázek 15 Zjednodušený vývojový diagram hlavního programu jednotky

4.3 Knihovna ds18b20

Pro zpracování dat z teplotního senzoru DS18B20 je vytvořena knihovna *ds18b20* obsahující funkci „*ds18b20_lib*“ s teplotou jako návratovou hodnotou. Funkce *ds18b20_lib* je volána z hlavního programu při odesílání dat do databáze. Raspberry Pi v základu podporuje sběrnici standardu One-wire, pomocí kterého komunikují čidla DS18B20. Pro umožnění tohoto druhu komunikace je nutné v konfiguračním souboru umístěném na cestě `/boot/config.txt`, přidat řádek obsahující text „`dtoverlay=w1-gpio`“, a poté restartovat Raspberry Pi. Po opětovném spuštění mikropočítače a po zadání příkazů „`sudo modprobe w1-gpio`“ a „`sudo modprobe w1-therm`“ se ve složce `/sys/bus/w1/devices/` zobrazí složka pojmenovaná unikátním 64-bitovým názvem konkrétního použitého teplotního čidla DS18B20. V případě této práce jde o název „28-0416339df3ff“. Tato složka obsahuje textový soubor „w1-slave“, který obsahuje data z teplotního senzoru ve formátu podobném následujícímu:

```
71 01 4b 46 7f 0f 10 56 : crc=56 YES
71 01 4b 46 7f 0f 10 56 t=21062
```

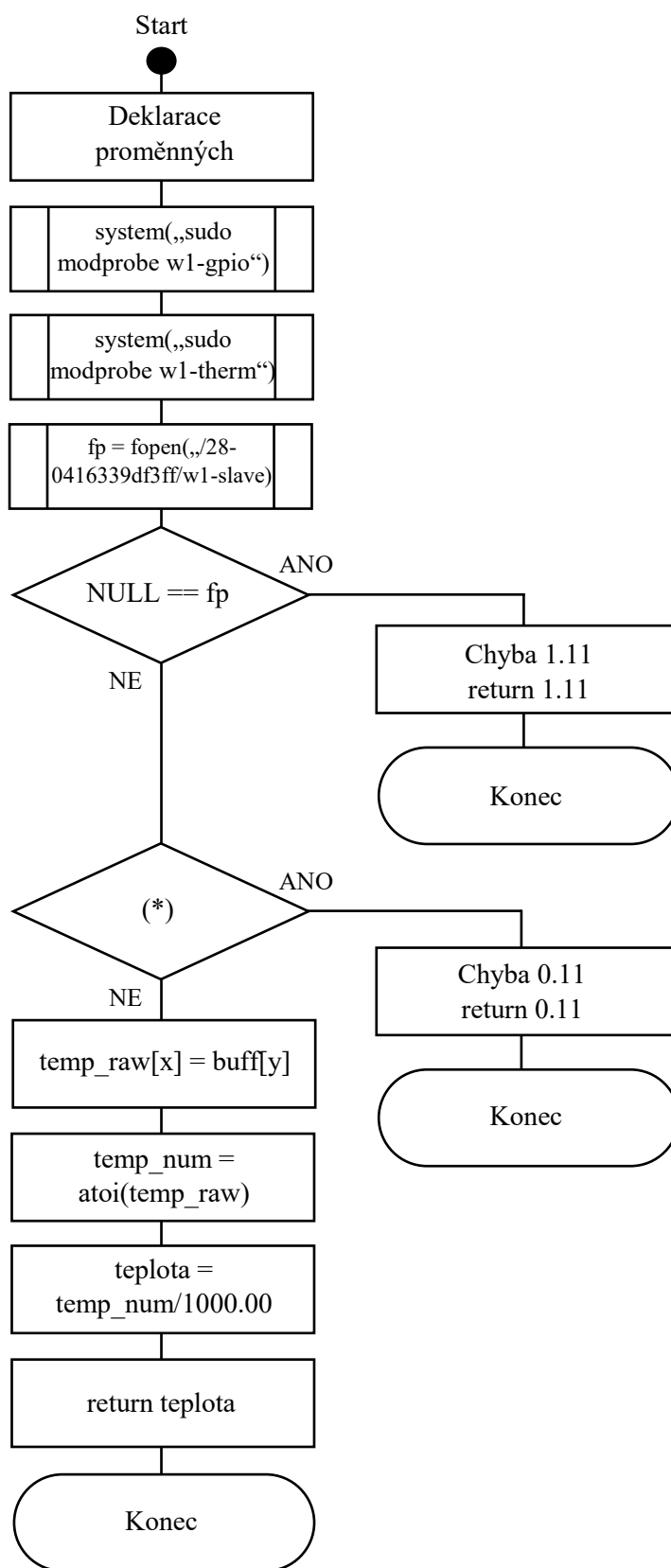
Pro tuto práci je stěžejní pouze hodnota na konci textového řetězce, a to 21062, jelikož představuje hodnotu teploty vynásobenou tisícem. Po několika pokusech se souborem „w1-slave“ bylo zjištěno, že kýžená data teploty jsou stále na stejném místě se stejnými indexy, a to 69 až 74. Poté již stačí v programu otevřít daný soubor a uložit data z určených indexů. Výstupní hodnota je ale řetězec a musí se pomocí funkce „atoi()“ převést na číslo a posléze vydělit tisícem. Výsledná hodnota datového typu float, tedy desetinné číslo, potom slouží jako návratová hodnota knihovny *ds18b20*.

V případě, že se hlavní program spustí bez připojeného čidla DS18B20, je knihovna doplněna o návratové hodnoty, které indikují daný problém viz tabulka 4.

Tabulka 4 Návratové hodnoty knihovny ds18b20

Návratová hodnota	Význam
1.11	Nenalezen soubor s hodnotou teploty
0.11	Chyba při čtení souboru w1-slave

Návratové hodnoty byly voleny tak, aby byly co nejméně zaměnitelné s reálnou teplotou, a zároveň aby výrazně neovlivnily rozsah zobrazované teploty ve vizualizačním programu v případě spuštění programu bez připojeného teplotního senzoru. Pro přehlednější popis funkce knihovny *ds18b20* tato práce obsahuje také zjednodušený vývojový diagram jmenované knihovny viz obrázek 16.



(*) – `SIZE*NUMELEM != fread(buff, SIZE, NUMELEM, fp)`

Obrázek 16 Zjednodušený vývojový diagram knihovny ds18b20

4.4 Databáze InfluxDB

Jako databáze pro výstupní data měřicí jednotky byla původně zamýšlena databáze MySQL. Nicméně po srovnání s alternativami se projevila jako výhodnější varianta použití databáze InfluxDB. Výhodou databáze InfluxDB je například automatické přidávání časové značky k příchozím datům a jednoduché propojení s vizualizačním programem Chronograf. Vzhledem k potřebě testování databáze ji bylo nejprve nutné nainstalovat podle návodu ze stránek Influxdata [14] a spustit v přímo v Raspberry Pi na adrese 127.0.0.1, tedy localhostu.

Je vhodné nastavit automatické spuštění databáze InfluxDB po startu systému pomocí příkazu:

```
sudo systemctl start influxdb
```

Nebo ji spouštět manuálně před spuštěním měřicího programu pomocí:

```
(sudo) influxd
```

Ověření chodu databáze influx je v případě localhostu možné na adrese localhost:8086. V případě, že databáze funguje, zobrazí se paradoxně:

„404 page not found“

Pro přidávání dat do databáze Influx nabízí množství hotových knihoven v mnoha programovacích jazycích, jako Python, Java, Haskell, Matlab, PHP a dalších. Bohužel pro jazyk C aktuální knihovna neexistuje. Prvním plánem propojení programu měřicí jednotky s tenzometrem bylo využití knihovny napsané v jazyku Python a následné předávání dat, nebo jiný druh propojení, s jazykem C. Po několika nezdarech a neznalosti principu spojení jazyka C a Python bylo snazší řešení vyhledat jiný druh komunikace. Naštěstí Influx nabízí také tzv. HTTP API podporující komunikaci pomocí HTTP požadavků. Pro zkoušku funkčnosti odesílání dat bylo nejprve využito nástroje příkazového řádku curl pomocí testovacího příkazu

```
curl -i -XPOST 'http://localhost:8086/write?db=cep0030' --data-binary 'data,prvni=111 druhy=234',
```

který do databáze s názvem cep0030 do tabulky „data“ přidá do sloupce s názvem „prvni“ hodnotu 111, a do sloupce s názvem „druhy“ hodnotu 234 [22]. Tento příkaz je mimo přidávání dat schopen i jmenovanou tabulku se sloupci vytvořit. Úspěšné přidání dat do databáze bylo ověřeno pomocí příkazu *influx* v příkazové řádce. Po zadání příkazu se spustí tzv. InfluxDB rozhraní příkazové řádky (InfluxDB command line interface), odkud je možné pomocí běžných SQL dotazů přistupovat k datům v databázi.

Programové přidávání dat do databáze je tedy zajištěno pomocí stejnojmenné knihovny „curl“ v jazyce C. Tato knihovna je schopná odesílat dotazy označované jako HTTP POST, které obsahují data do databáze. Jelikož v praxi nebude databáze dostupná pouze v lokálním počítači, byl InfluxDB nainstalován i na školním serveru <http://enviro.vsb.cz>. Výsledný příkaz v hlavním programu jednotky s tenzometrem pro odeslání dat pomocí knihovny „curl“ je tedy sestaven jako požadavek na adresu

```
http://enviro.vsb.cz:8086/write?db=cep0030
```

například s daty

```
HX711,autor=CEP0030 raw=8531909,hmotnost=49.943516,teplota=21.30
```

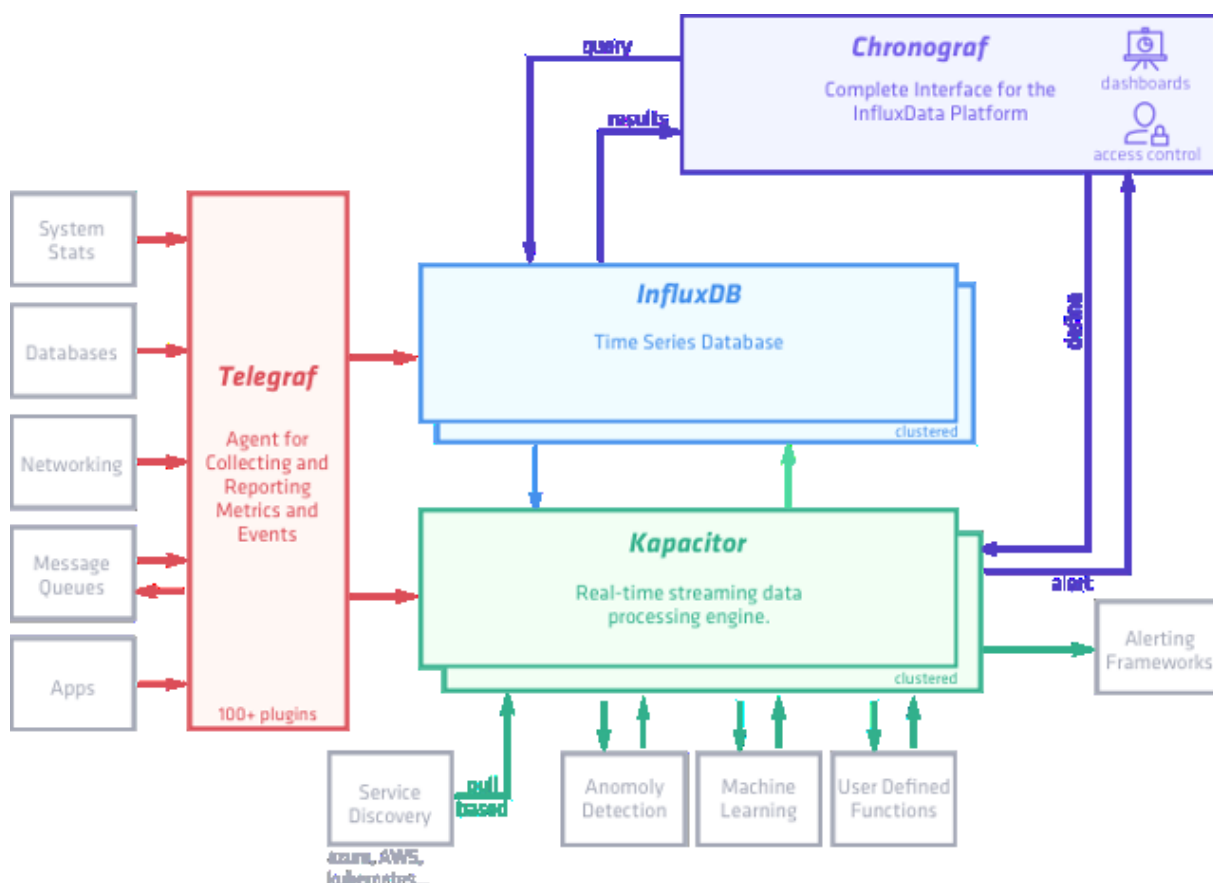
Pro přidávání dat na školní server je nutné být připojen ke školní síti přes VPN. K tomu je využitý nástroj příkazové řádky openconnect spuštěný příkazem

```
sudo openconnect vpn.vsb.cz.
```

Poté musí být zadán druh připojení [vsb, vsb_localinet, vsb_only, adm], a nakonec přihlašovací údaje stejné jako v IS Edison.

4.4.1 Chronograf a Kapacitor

Odesílání dat do databáze InfluxDB funguje podle očekávání, je tedy čas na další zpracování dat jako je vizualizace a upozornění na hazardní stavy. K těmto účelům jsou použity další součásti rodiny Influxdata viz obrázek 17.



Obrázek 17 Architektura produktů InfluxData [14]

Chronograf je uživatelské prostředí pro monitorování dat z databází InfluxDB, a také pro zobrazování upozornění z aplikace Kapacitor. Výsledný vzhled vizualizace dat je zobrazen v příloze na konci dokumentu viz Příloha II.

4.5 Kompilace

Kompilace je překlad zdrojového souboru do spustitelné formy. Po každé úpravě zdrojového kódu nebo změně zařízení, kde se program spouští, je nutné provést kompilaci znovu. Kompilace běžným způsobem ve vývojovém prostředí zpravidla nefunguje, jelikož není schopna dohledat potřebný zdrojový soubor vytvořené knihovny, proto musíme pro kompilaci použít příkaz:

```
Gcc -c hx711.c -o hx771.o           - pro knihovnu hx711
Gcc -c ds18b20.c -o ds18b20.o       - pro knihovnu ds18b20
```

k vytvoření objektových souborů jednotlivých knihoven, které jsou poté používány při kompilaci zdrojového souboru obsahujícího knihovnu. Po vytvoření objektových souborů je potřeba je používat při každé kompilaci programu obsahující dané knihovny. Kompilace souboru obsahujícího knihovnu hx711 a ds18b20:

```
Gcc -o soubor soubor.c hx711.o ds18b20.o -lwiringPi -lcurl
```

Ke správnému provedení kompilace je nutné připojit ještě parametry *-lwiringPi* a *-lcurl* odkazující na další použité knihovny, a to „wiringPi“ a „curl“.

5 Testování modelu jednotky s tenzometrem

Jelikož se jedná o měřicí jednotku určenou pro dlouhodobé monitorování zatížení střech, je nutné, aby fungovala samostatně i bez vnějšího zásahu. Testování probíhalo připojením jednotky k databázi umístěné na síti VŠB pomocí VPN a odesílání naměřených dat na adresu enviro.vsb.cz. Na této adrese se nachází monitorovací rozhraní Chronograf, kde je zobrazena vizualizace dat za vybraný časový úsek viz Příloha II. Na vizualizaci Chronograf je možné pozorovat aktuální zátěž na tenzometru. Příloha II zobrazuje průběh vizualizace při testování tenzometru pomocí závaží o různých hmotnostech – 50 g, 500 g, 1 kg a 2 kg. Dle zobrazeného grafu je možné usoudit, že jednotka při pokojové teplotě pracuje podle očekávání. Při vážení závaží s hmotností 1000 g při pokojové teplotě je odchylka od skutečné hodnoty maximálně 2 g. Absolutní chyba je tedy podle vztahu (8) ± 2 g.

$$\Delta = M - S \quad (8) [19]$$

To odpovídá relativní chybě 0,2 % podle vztahu (9).

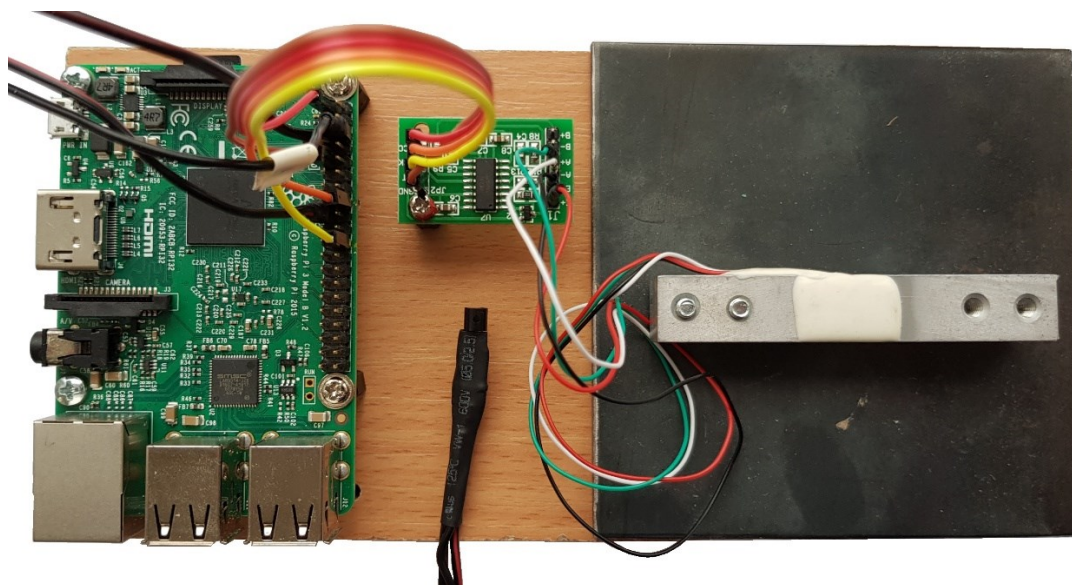
$$\delta = \frac{\Delta}{S} * 100 \quad (9) [19]$$

Kde **M** je naměřená hodnota, **S** je skutečná hodnota, Δ je absolutní chyba a δ je relativní chyba.

V dalším kroku proběhlo testování teplotní závislosti tenzometru. Zatížený tenzometr spolu s teplotním senzorem DS18B20 byl zkalibrován při pokojové teplotě a poté zchlazen na cca 4 °C, přičemž se v desetisekundových intervalech odečítala hmotnost přiloženého závaží. Odchylka při zchlazení tenzometru byla srovnatelná s běžnou odchylkou měření při pokojové teplotě.

Poté byl tenzometr zahříván na 40 °C. Zde již byla absolutní chyba měření až ± 20 g. Příčinou v tomto případě ale může být nerovnoměrné, nebo příliš prudké zahřívání deformačního členu tenzometru, jelikož po ukončení nahřívání se chyba vrátila zpět na výrazně menší odchylku, přestože teplota tenzometru stále dosahovala 36 °C.

Na obrázku 18 se nachází výsledné sestavení jednotky s tenzometrem použité pro testování.



Obrázek 18 Měřicí jednotka s tenzometrem

Závěr

Tato bakalářská práce obsahuje popis problematiky zatížení střech, především zatížení sněhem, jelikož zatížení sněhem patří mezi nejčastější příčiny havárií střešních konstrukcí. Dále se práce zabývala stručným popisem jednotlivých druhů tenzometrů a výběru nejvhodnějšího typu pro tento druh použití.

K naplnění cíle této bakalářské práce, tedy realizace jednotky s tenzometrem pro internet věcí, bylo využito kovového odporového tenzometru s vlastním deformačním členem. Dále bylo využito 24-bitového převodníku analogových hodnot na digitální, s názvem HX711, a mikropočítače Raspberry Pi 3 model B. Práce obsahuje jednotlivé kroky při konstrukci zařízení a postup vytváření softwaru jednotky. Při testu modelu jednotky s tenzometrem bylo rozhodnuto, že se výsledné zařízení doplní o teplotní senzor DS18B20 za účelem testování závislosti naměřené hodnoty z tenzometru na teplotě.

Naměřená data z jednotky byla odesílána k pozdějšímu zpracování do databáze InfluxDB umístěné na serveru enviro.vsb.cz Vysoké školy báňské. Databáze InfluxDB podporuje s pomocí aplikace Chronograf monitorování naměřených dat a různé možnosti vizualizace. Chronograf dále obsahuje rozšíření nazývané Kapacitor sloužící k indikaci dosažených hazardních hodnot zatížení a možnosti spuštění varování při jejich překročení.

V dalším vývoji by jednotka měla být doplněna o krabičku, která vlastnostmi odpovídá případnému použití při vážení skutečné střešní konstrukce a o případný přepočet dat v případě, že by docházelo k výraznější odchylce vlivem teploty. Dále by bylo vhodné jednotku doplnit o záložní zdroj elektrické energie pro případ výpadku, a také o ukládání nastavených kalibračních dat, například do konfiguračního souboru.

Literatura

- [1] VODOLAN, Miloš. KONSTRUKCE Media, s.r.o. *Havárie střešních konstrukcí - viníkem není pouze sníh* [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, 2009 [cit. 2019-01-25]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/havarie-stresnich-konstrukci-vinikem-neni-pouze-snih/>
- [2] *Mechanika konstrukcí: Zatížení stavebních konstrukcí*. Ostrava, 2016. Dostupné také z: http://fast10.vsb.cz/kolos/file/MECHK/mechanika_konstrukci_4.pdf
- [3] ŠOFER, Michal. *Tenzometrie I*. Ostrava, 2018. Dostupné také z: <http://homel.vsb.cz/~sof007/files/EMvM/p3.pdf>
- [4] ČSN EN 1991-1-3 změna A1 (730035) *Eurokód 1: zatížení konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [5] HRAZDIL, Jiří. ČSN EN 1991-1-3 (730035). *Normy.biz* [online]. Popůvky, ©2003-2019 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/detail/72773> Popis normy 1-3
- [6] *Zatížení sněhem. Salvator střechy s.r.o.* [online]. Loukov, ©2012 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <http://www.salvatorstreachy.cz/snehova-mapa>
- [7] *Mapa sněhových oblastí do listopadu 2006. Sníh na střeše* [online]. Uhřetín: Llentab, ©2006 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://www.snihnastrese.cz/mapa-snehovych-oblasti-do-listopadu-2006/>
- [8] Safibra, s.r.o. *Monitoring zatížení střech* [online]. Říčany: Safibra, 2019 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <http://www.safibra.cz/strechy>
- [9] GIRGLE, František. Speciální monitory hlídají střechy. *Mediavut* [online]. Brno: Mediavut, 2013 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://mediavut.wordpress.com/author/mediavut/page/2/>
- [10] GPIO. *Raspberry Pi* [online]. UK: Raspberry Pi Foundation, 2019 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/>
- [11] Maxim Integrated Products Inc., [online katalogový list]. *DS18B20*. © 2018 [cit. 10.04.2019]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [12] Broadcom Corporation, [online katalogový list]. *BCM2835 ARM Peripherals*. © 2012 Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/app/uploads/2012/02/BCM2835-ARM-Peripherals.pdf>
- [13] File:Strain gauge.svg. In: *Wikimedia Commons* [online]. Wikimedia Commons, 2015 [cit. 2018-12-25]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=893221>
- [14] *Influxdata, Inc.* [online]. San Francisco: Influxdata, ©2019 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://www.influxdata.com/>
- [15] Avia Semiconductor, [online katalogový list]. *HX711*. [cit. 10.10.2018]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf
- [16] Experimentální metody: Snímače pro měření deformace. *Repozitář DSpace 6.3* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, ©2002-2012 [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/149161/prednaska3.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- [17] GASNÁREK, Jiří. *Využití bezdrátových technologií k přenosu audio signálu*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [18] UPTON, Eben a Gareth HALFACREE. *Raspberry Pi: uživatelská příručka*. Brno: Computer Press, 2013. ISBN 978-80-251-4116-8.

- [19] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika – senzory, metody, analýza signálu – 4. díl edice Senzory neelektrických veličin*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 978-8073001582.
- [20] FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Cham Heidelberg: Springer, 2015. ISBN 978-3319193021.
- [21] MOLLOY, Derrek. *Exploring Raspberry Pi: Interfacing to the Real World with Embedded Linux*. Indianapolis: Wiley, 2016. ISBN 978-1119188681.
- [22] KERNIGHAN, Brian W. a Dennis M. RITCHIE. *Programovací jazyk C*. Praha: Computer Press, 2014. ISBN 978-80-251-0897-0.

Seznam příloh

Příloha I Mapa sněhových oblastí na území ČR [4]

Příloha II Vizualizace pomocí Chronografu

Příloha III Spustitelný program jednotky – CEP0030 (Příloha v IS Edison)

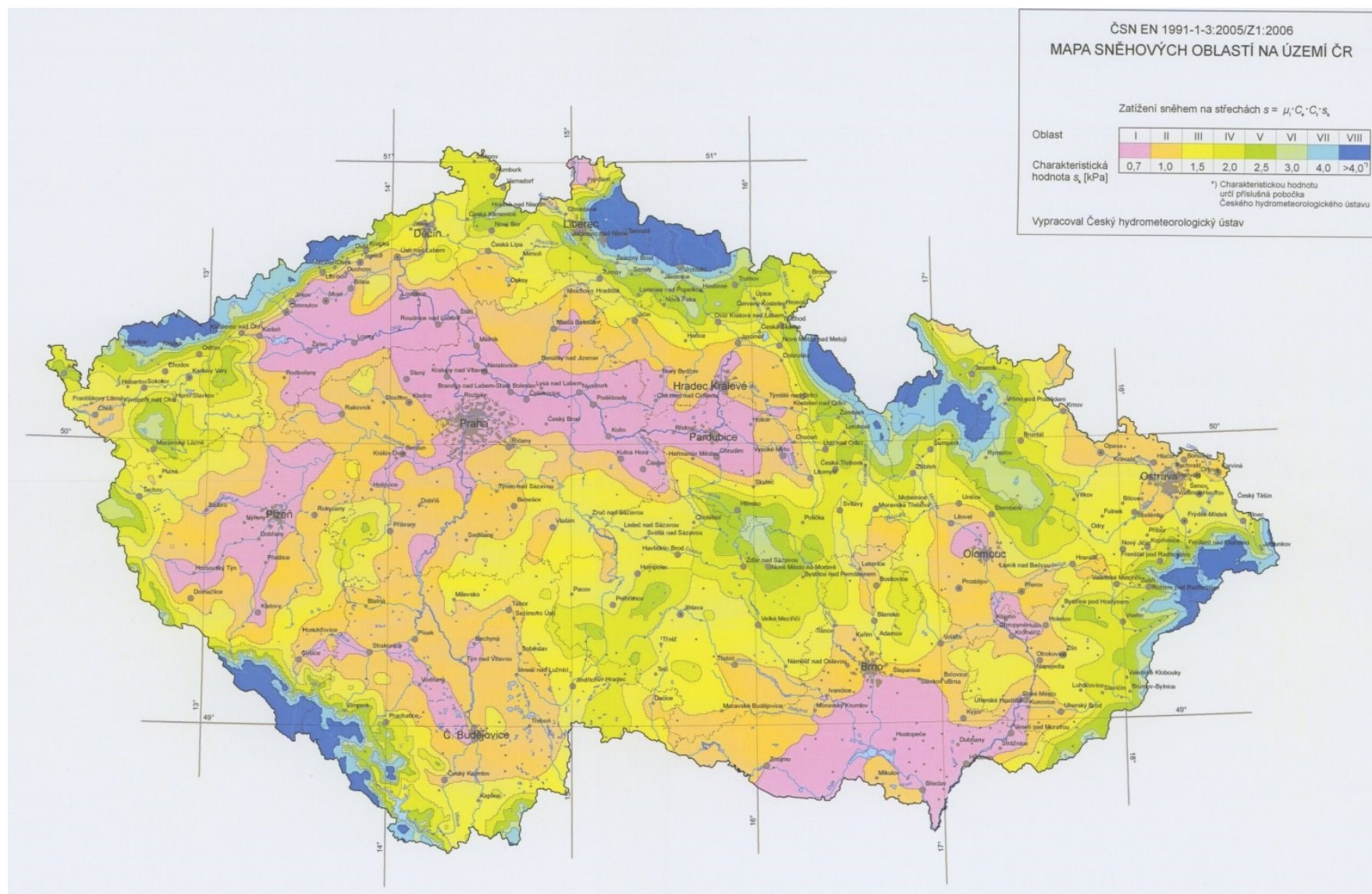
Příloha IV Zdrojový soubor programu jednotky – CEP0030.c (Příloha v IS Edison)

Příloha V Zdrojový soubor knihovny hx711 – hx711.c (Příloha v IS Edison)

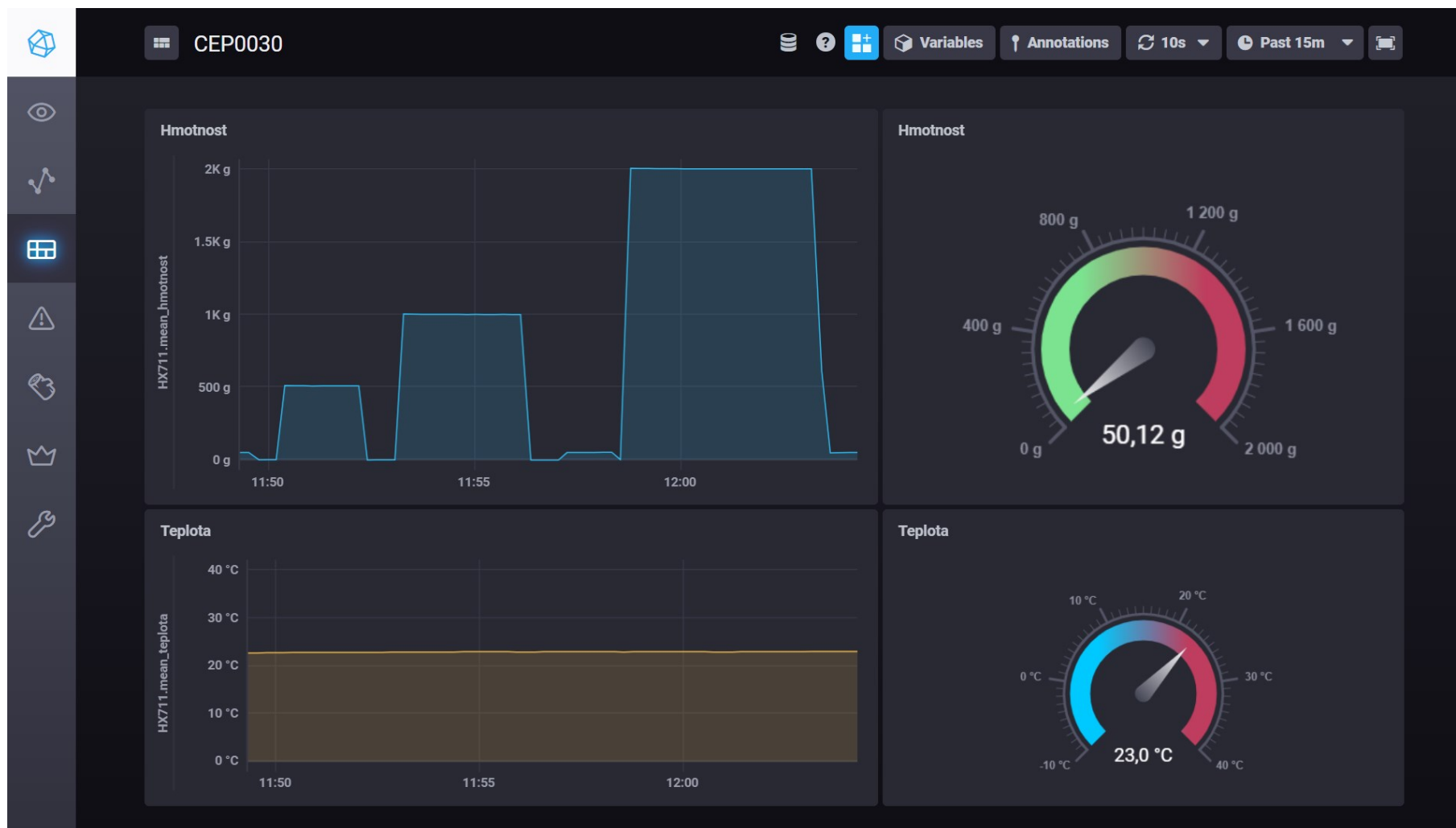
Příloha VI Hlavičkový soubor knihovny hx711 – hx711.h (Příloha v IS Edison)

Příloha VII Zdrojový soubor knihovny ds18b20 – ds18b20.c (Příloha v IS Edison)

Příloha VIII Hlavičkový soubor knihovny ds18b20 – ds18b20.h (Příloha v IS Edison)



Příloha I Mapa sněhových oblastí na území ČR [4]



Příloha II Vizualizace pomocí Chronografu